

原 著

高齢者における視覚および振動外乱に対する 姿勢制御応答：青壮年との比較

中 川 肇

富山医科薬科大学耳鼻咽喉科学教室

Postural responses to the proprioceptive disturbance and to the vision in the elderly

Hajime NAKAGAWA

Department of Otolaryngology, Toyama Medical and Pharmaceutical University, Toyama 930-01,
Japan

Key words : aging, stabilometry, vision, proprioception, fast Fourier transform

要 旨

直立姿勢制御は視覚、前庭、および固有受容体からの入力の中樞で統合され抗重力筋に出力されることによって維持される。高齢者ではこの姿勢制御が加齢の影響を受けて、身体の動揺が大きくなることが明らかにされている。しかるにこれらの入力がかどのように障害されているかについての研究はほとんどない。このため、直立姿勢を重心動揺として記録、分析し、さらに、下腿三頭筋に振動刺激を加えることにより固有受容体入力に外乱を生じさせた条件、および視覚を消失させた条件における重心動揺を青壮年者と比較検討した。その結果、①高齢者の身体動揺の増加は、前後方向の動揺性に依存すること ②視覚入力の寄与は青壮年者と比較しても低下がみられず、周波数分析により寄与が大きいこと ③振動を負荷しても、高齢者では重心動揺に変化がみられず、固有受容体入力の寄与が低下していることが明らかにされた。

はじめに

高齢化社会を迎えて、高齢者のめまい、平衡障害の症例が増加し、日常生活上においても、平衡障害に起因する事故が発生しやすい傾向がある^{1,2)}。直立静止姿勢の維持に寄与する入力には前庭系、視覚系、および体性感覚としての固有受容体系がある。これらの系のうち、いずれが青壮年者と比較してどのように障害を受けているのかについては、固有受容体入力に障害されているとの Pyykkö ら^{3,4)}によ

る報告以外にない。本論文の目的は直立姿勢維持に関与する生理学的機構のいずれが高齢者ではどのように障害を受けており、平衡障害を起こしやすいかについて解析することにある。

対象および方法

1. 対 象

正常高齢者の条件を次のように設定した。

直立静止姿勢の維持に寄与する前庭系、視覚系、

固有受容体系の感覚入力系に臨床的に異常が認められず、かつ、末梢知覚神経にも異常がなく、脊柱姿勢が正常範囲内にあり、老年性痴呆症状もなく、日常生活に支障がないものとした。また、めまい・平衡障害の治療歴および転倒事故の既往がないことも必要条件とした。これらは、日常生活についての詳細な問診のほか、階段昇降、歩行、起立時の運動系障害のないこと、振動覚を含めた知覚機能が障害されていないこと、および小脳症状のないことが確認された。この結果、青壮年者群は22才から29才までの医学部学生21名(男子20名、女子1名以下第Ⅰ群)、上述の諸条件を満たす高齢者群として65才から74才までの8例(男性5例、女性3例、平均年齢69.4才、以下第Ⅱ群)および、75才から86才までの16例(男性8例、女性8例、平均年齢79.3才、以下第Ⅲ群)の3群を対象とした。

2. 刺激条件

被検者をロンベルグ足位、すなわち接足位で重心動揺計のプラットフォーム上に30秒間、開眼させ、次いで閉眼の順で起立させた。開眼時には眼前50cmのディスプレイ上に表示された直径4mmの一点を固視させた。さらに各々、固有受容体の外乱として両アキレス腱上の皮膚に阻血を生じないように注意して振動子(TMT18, 平和電子製, 東京)をゴムバンドで装着して、100Hzの振動を負荷した。

3. 重心動揺のパラメーターと分析方法

重心動揺計は Anima Gravicorder G1803 (アニマ社, 東京) を使用した。重心動揺の分析には、マイクロコンピュータPC9801VM2を使用し、重心動揺図の面積、軌跡長および周波数をパラメーターとした。データは10Hzのハイカットフィルタを通して、サンプリング周波数25Hzで分析した。面積は左右、前後動揺の最大径の積、軌跡長は40msecごとの左右、前後方向の動揺長を積分したものとした。また左右、前後方向の周波数分析は高速フーリエ変換(以下FFTと略)で行い、全データのサンプリング周波数は25Hzで、512点について分析した。すなわち、FFTで求められた最小の周波数間隔は $25 \div 512 = 0.049\text{Hz}$ となる。FFTで分析できる最大周波数(ナイキスト周波数)は $(512 \div 2) \times (25 \div 512) = 12.5$

Hzとなる。分析時には、左右、前後方向の直流成分を除去したのち、0.10Hzから3.96Hzまでの0.245Hzごとの16周波数帯域における周波数成分のパワースペクトラム密度(以下、パワースペクトラムと略す)と周波数スペクトラムの総和をコンピュータに表示し、比較した。パワースペクトラムは重心動揺計のA/Dコンバータの出力特性から周波数スペクトラムが0.05cmのときに0dBと定義された。各検査は3回ずつ施行し、オンラインで表示された面積が最低値をとるものを分析の対象とした。検定はt検定およびWilcoxon順位和検定で行い5%以下の危険率をもって有意とした。

結 果

1. 直立姿勢での重心動揺性

第Ⅱおよび第Ⅲ群ではすでに第Ⅰ群と比較して、有意に重心動揺図の面積と軌跡長は増大し、3群間での差異は有意であった。また、第Ⅲ群での個体差は大きかった(図1)。この重心動揺の0.1Hzから3.96Hzまでの周波数スペクトラムの総和において、第Ⅰ群および第Ⅱ群では前後動揺が左右動揺より小さ

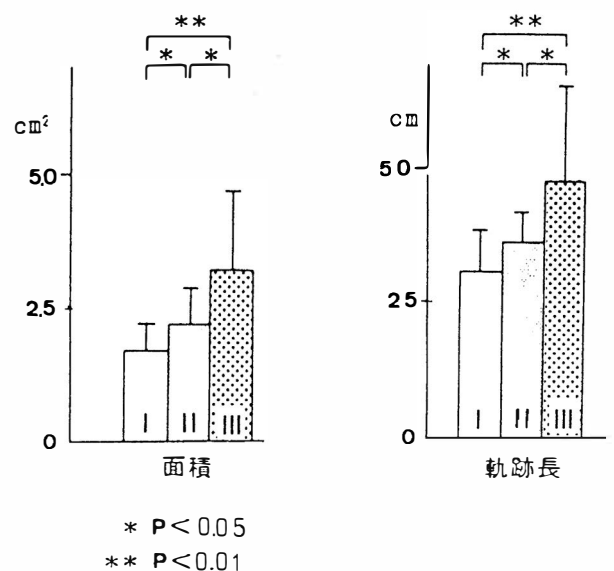


図1. 直立姿勢での3群間の重心動揺面積および軌跡長の比較。重心動揺の面積(左)において、第Ⅲ群は第Ⅰおよび第Ⅱ群と比較して動揺面積の有意な増大を示した。

軌跡長(右)では第Ⅲ群は第Ⅰおよび第Ⅱ群と比較して有意な増大を示した。

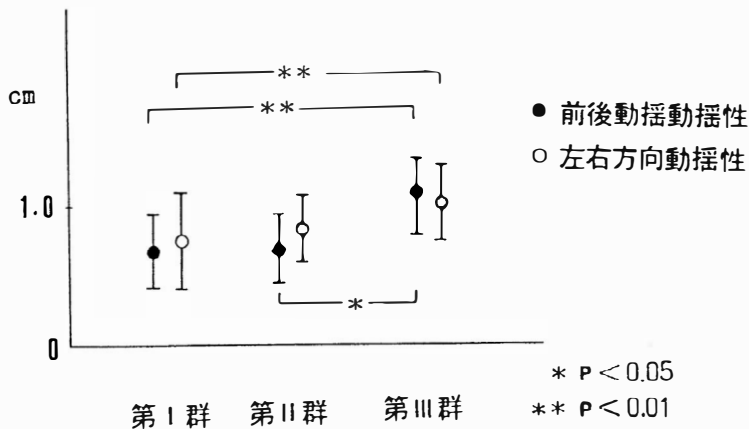


図2 直立姿勢での3群間の0.1Hzから3.96Hzまでの前後、左右方向別の周波数スペクトラムの総和の比較。第Iおよび第II群では左右方向の動揺が前後動揺より大きい。第III群では前後動揺が左右動揺より大きい。第III群は第I群と比較して左右、前後両方向ともに有意なスペクトラム密度の増大があるが、第III群は第II群と比較して前後方向にのみ有意な増大を示した。

表1 視覚入力への寄与（ロンベルグ比の検討）

重心動揺図	青壮年者 平均値(標準偏差)	高齢者 平均値(標準偏差)
面積(cm ²)	2.68(1.02)	2.78(1.80)
軌跡長(cm)	1.65(0.40)	1.98(0.64)

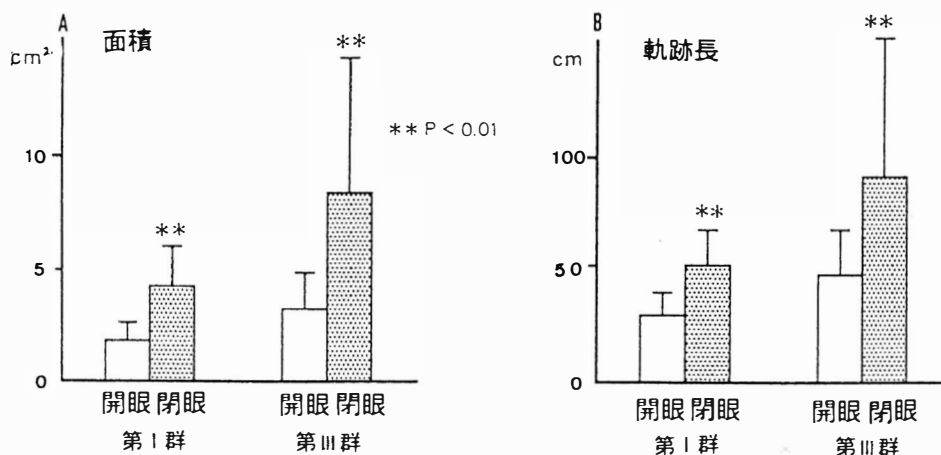


図3 重心動揺性に対する視覚の影響。第I群および第III群ともに閉眼時に有意な動揺の増加がみられた。第III群では、閉眼時に標準偏差が大きい値を示した。

いのに反し、第III群では前後動揺が左右動揺よりも優位であった。左右、前後動揺ともに、第II群と第I群との間には有意差はみられなかったが、第III群と第II群の間には前後動揺に関して第III群に有意な増大を認めた(図2)。第III群の高齢者では加齢の影響は前後動揺により強くあらわれた。以上の結果から第II群の高齢者の重心動揺性は青壮年者との差はないと判断された。故に以下の検討では75才以上のもの(第III群)と青壮年者(第I群)との2群を比較検討した。

2. 視覚入力への寄与について

a) 重心動揺図の面積、軌跡長の変化

第I群および第III群ともに閉眼時には閉眼時に比べて重心図の面積、軌跡長ともに有意に増大を示した。この増加の割合は第III群で著明であり、より個体差を生じる傾向が認められた(図3A, B **印 $P < 0.01$)。

b) ロンベルグ比(閉眼値/開眼値)の変化

ロンベルグ比でみた第III群における面積は、2.78、軌跡長は1.98であり、第I群の面積の2.68および軌跡長の1.65と比べると、2つのパラメーターで高値を示す傾向があったが、第I群と比べて有意差は見られなかった(表1)。

c) 周波数分析における変化

第I群および第III群において、開眼時における左右方向および前後方向の動揺のパワースペクトラムを0.1Hzから3.96Hzまでの16周波数帯域にわたって分析した結果、すべての帯域に、閉眼時のそれと比べて有意な減少が認められた。さらにこ

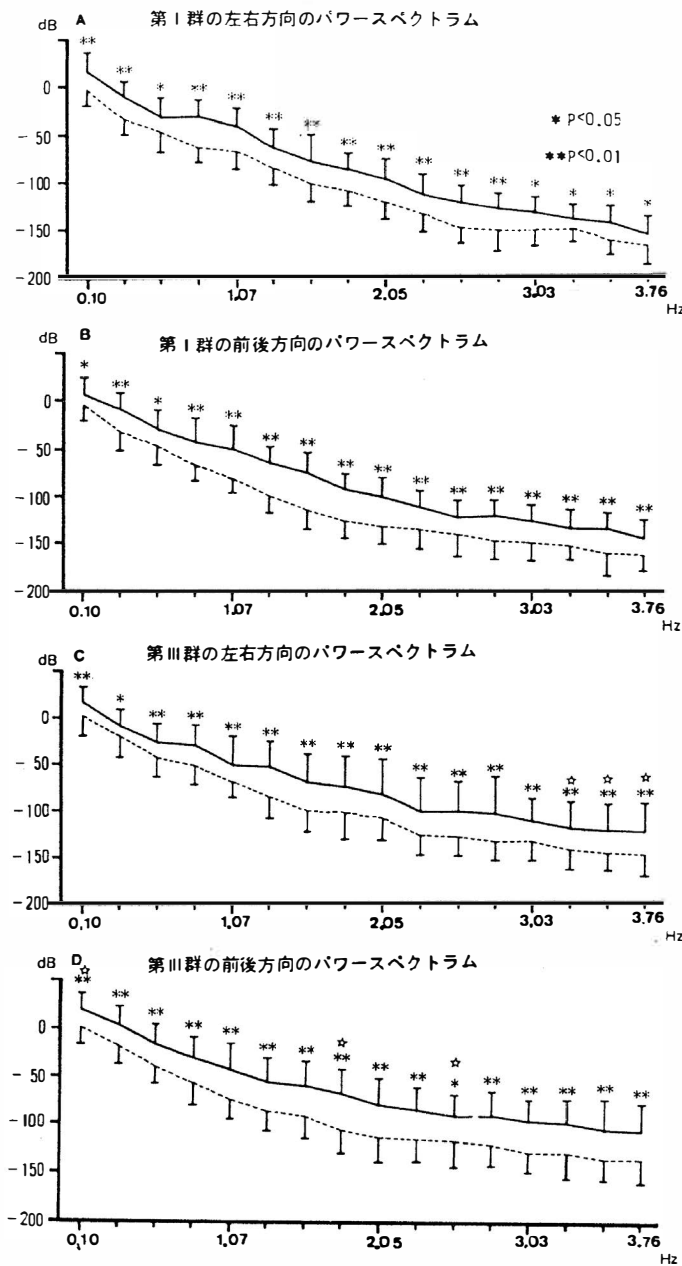


図4 パワースペクトラム密度に対する視覚の影響。実線は閉眼時、破線は開眼時。両群とも左右、前後方向とも0.1Hzから3.96Hz(4)Hzまでの16周波数帯域において閉眼時に有意なパワースペクトラムの増加がみられた。☆印は、第I群に比較して開閉眼時のパワースペクトラム密度の差が有意に増加していた第III群の周波数帯域を示した。

これらの16周波数帯域におけるパワースペクトラムについて、開眼時と閉眼時の差を算出し、第III群と第I群とで差がみられるか否かについて検討した。その結果、第III群におけるパワースペクトラムの差は

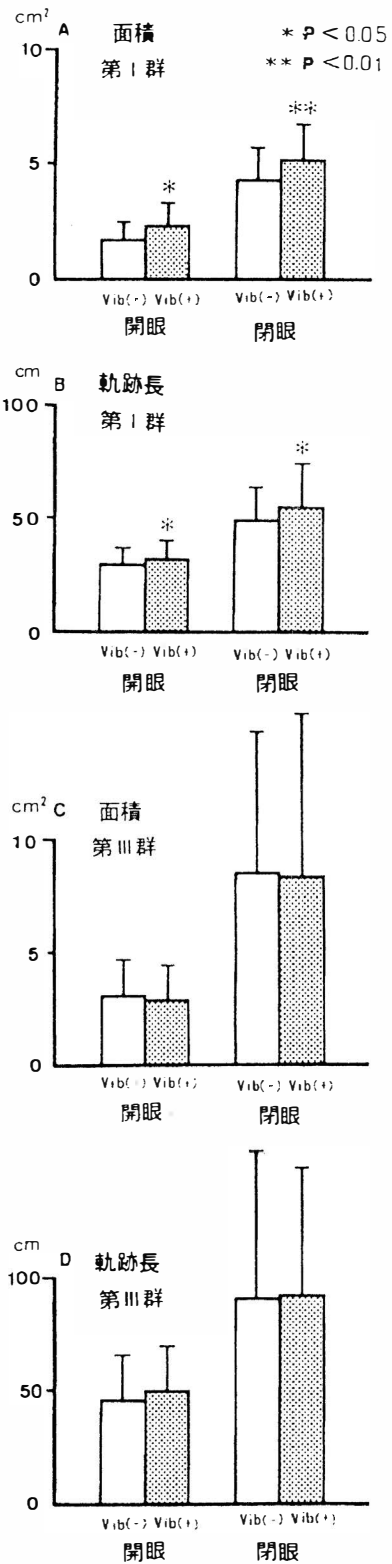


図5 固有受容体外乱に対する重心動揺性の変化。上段(A, B)は第I群における変化、下段(C, D)は第III群の変化。第I群では、振動負荷時に開眼閉眼時ともに動揺の増加がみられたが、第III群では動揺の増加がみられなかった。

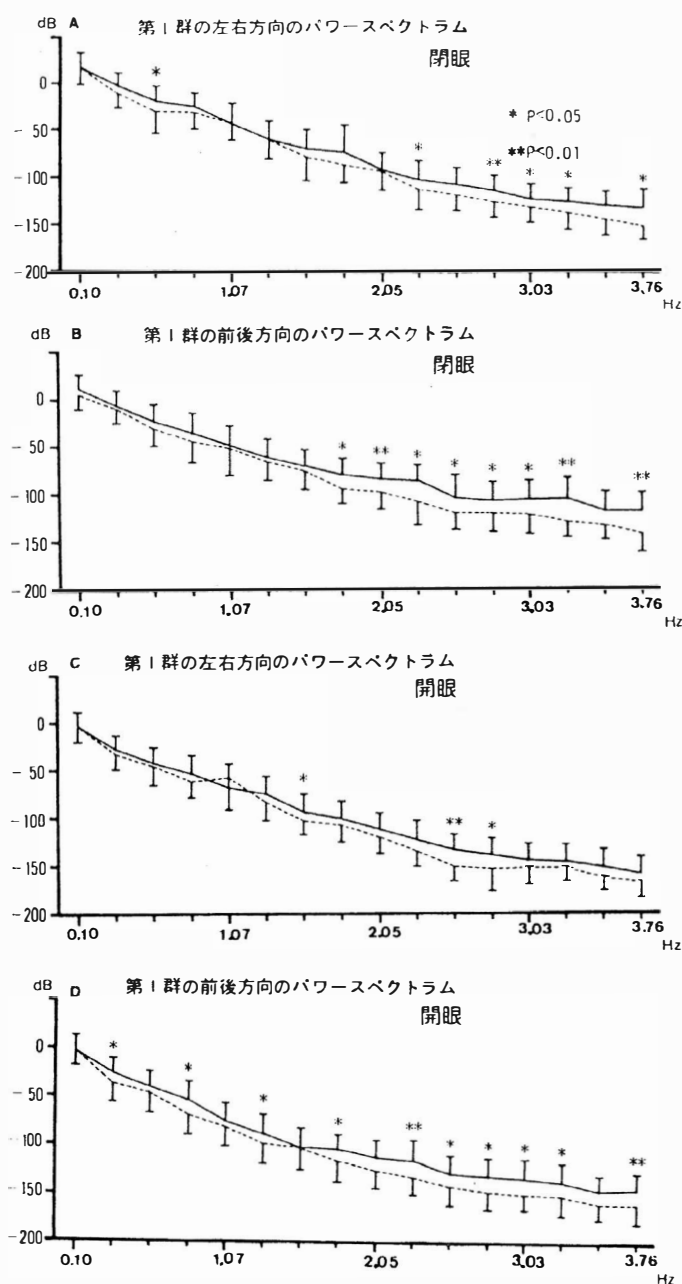


図6 青壮年者における固有受容体外乱に対するパワースペクトラム密度の変化。実線は振動負荷時の、破線が無負荷状態のパワースペクトラム。2 Hz以上の周波数帯域において、パワースペクトラムの増加がみられ、かつ前後方向動揺性において著明であった。

第I群のそれと比較して左右動揺では、3 Hz以上で3つの周波数帯域に（図4 C, ☆印 $P < 0.05$ ）、前後動揺では0.1 Hzから0.29 Hzまでの周波数帯域と2 Hz前後の2周波数帯域、合計3つの周波数帯域において（図4 D, ☆印 $P < 0.05$ ）有意な増加がみられた。

3. 固有受容体外乱による変化

a) 面積、軌跡長の変化

第I群では、重心動揺図の面積および軌跡長は開眼、閉眼時ともに振動負荷により有意に増加がみられた。面積のばらつきは大きかったが、軌跡長では平均13%の増加を示した（図5 A, B *印 $P < 0.05$, **印 $P < 0.01$ ）。これに対して、第III群の重心動揺図の面積および軌跡長は、開眼、閉眼時ともに振動負荷の影響を受けなかった（図5 C, D）。

b) 周波数分析による変化

第I群では、開眼時、閉眼時ともに振動負荷によるパワースペクトラムへの影響は、左右方向の動揺に比べ前後方向の動揺により顕著に現れた。閉眼時には振動負荷による左右方向の動揺は0.59—0.78 Hzの周波数帯域と2.29 Hz以上で5つの周波数帯域においてパワースペクトラムの増加として現れた（図6 A *印 $P < 0.05$, **印 $P < 0.01$ ）。前後方向の動揺については、1.81 Hz以上の8つの周波数帯域にパワースペクトラムの増加がみられた（図6 B *印 $P < 0.05$, **印 $P < 0.01$ ）。一方、開眼時では、左右方向の動揺は1.46—1.65 Hzの周波数帯域および2.54—2.98 Hzの2つの周波数帯域においてのみパワースペクトラムの増加がみられた（図6 C *印 $P < 0.05$, **印 $P < 0.01$ ）。前後方向の動揺は1.81 Hz以上の7つの周波数帯域に加えて、1.81以下で3つの周波数帯域においてパワースペクトラムの増加がみられた（図6 D *印 $P < 0.05$, **印 $P < 0.01$ ）。第III群では、振動負荷による影響は第I群と対照的であった。すなわち、閉眼時における左右方向の動揺では、0.34—0.53 Hzおよび2.29—2.49 Hzの2つの周波数帯域においてのみパワーの増加が見られた（図7 A *印 $P < 0.05$ ）。これに対して、前後方向の動揺では、0.26—0.48 Hzの周波数帯域では、逆にパワースペクトラムは減少した。しかし、2.54 Hz以上の3つの周波数帯域でパワースペクトラムの増加が認められただけであった（図7 B *印 $P < 0.05$ ）。一方、開眼時振動負荷により、左右方向の動揺では、いず

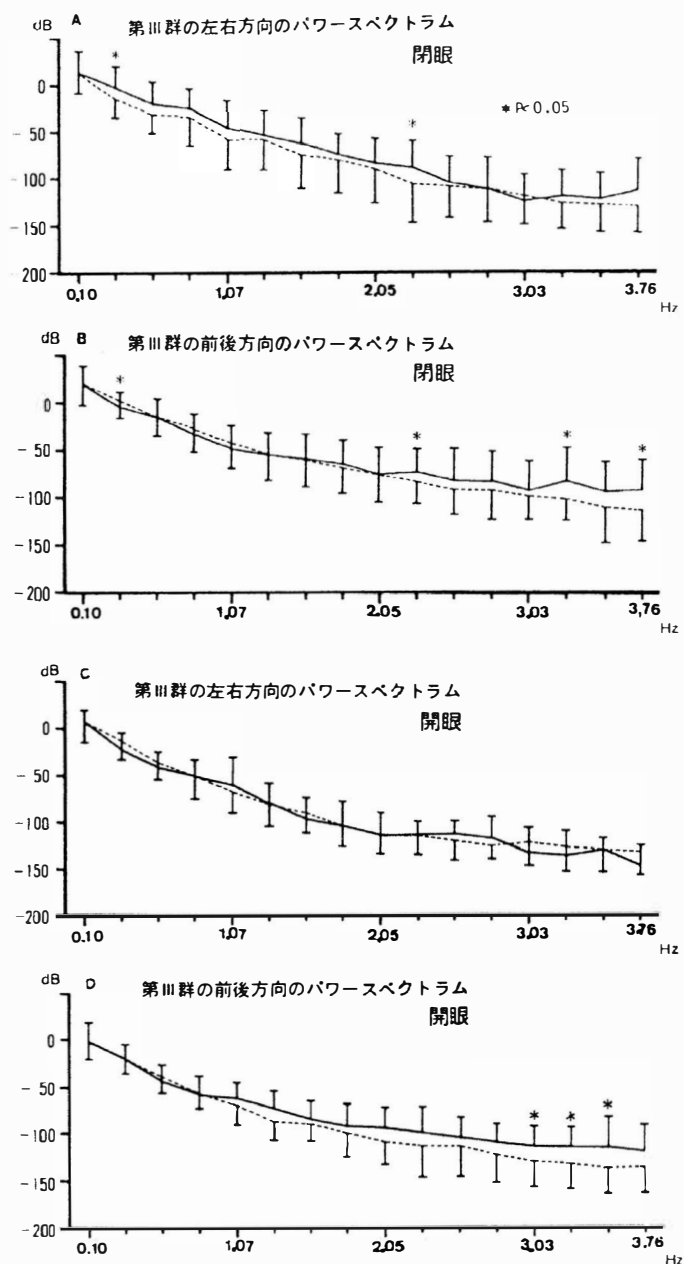


図7 第Ⅲ群高齢者における固有受容体外乱に対する変化。実線は振動負荷時の、破線は無負荷状態のパワースペクトラム。閉眼時左右方向には2 Hzの1周波数帯域、前後方向には2～3 Hzの3周波数帯域のみにパワースペクトラムの増加がみられた。開眼時に左右方向にはパワースペクトラムの増加はみられず、前後方向には3～4 Hzの3周波数帯域にパワースペクトラムの増加がみられた。

れの周波数帯域でもパワースペクトラムの増加はみられず(図7C)、前後方向の動揺では、3.03 Hz以上で3つの周波数帯域にパワースペクトラムの増加が

認められた(図7D *印 $P < 0.05$)。以上の結果から高齢者においては姿勢制御に振動の影響はより少ないことが示唆された。

考 察

平衡障害に関するわれわれの調査、研究の結果からみると、加齢による前庭反応の低下はみられない。

さて、本研究で、重心動揺図の面積および軌跡長の3群間比較において75才以上の群で加齢の影響が強かったことが特徴的所見であった。Brocklehurst ら⁶⁾によると、65～74才の群では重心動揺面積は、青壮年者との差異は少なく、老化による平衡機能障害が不完全であると報告している。また、河野ら⁷⁾による開眼時の軌跡長の分析では、女性では70才以上で初めて20才台との間に有意差がみられたと報告しており、今回の結果と一致していた。したがって社会医学的には75才以上の高齢者が生活上で問題があるものと推察された。一方、面積および軌跡長は、加齢に従って個体差も大きくなる傾向を示すことも一つの特徴である。

高齢者にみられる身体動揺は、前後動揺性に依存する。この点は今までに報告されていなかった。この前後動揺性の増加は、後述する固有受容体と抗重力筋の力学特性を反映しているものと推察した。

今回の研究で、加齢とともにロンベルグ比は、大きくなる傾向があり、視覚に頼る傾向が推察されたが、生理学的には、視覚情報を介した制御機構には加齢の影響は少ないかもしれない。ロンベルグ比は、高齢者では比が大きくなるとする Straube ら⁸⁾の結果、あるいは高齢者では視覚の依存が高い傾向にあるとする Woollacott ら⁹⁾の結果がある。Brocklehurst ら⁶⁾は、高齢者でもロンベルグ比は変わらないとした。本研究の結果は後者と一致するものであった。

重心動揺の周波数はほとんどが4 Hz以下の動揺であり、この範囲で動揺が分析されている¹⁰⁾。視覚情報が消失すると重心動揺性は増加し、周波数分析により 0.1 Hzから3.96 Hzの広い周波数帯域に視覚

が寄与することが本研究の結果からはじめて明らかになった。左右、前後方向ともに、高齢者群においては閉眼時のパワースペクトラムの増加が、青壮年者のそれと比較して有意差がみられた結果は、壮年者との比較において視覚の影響は周波数特異性があることを示唆する。

視覚情報を介した姿勢制御については、外側膝状体—有線野系および膝状体外視覚系の関与が考えられている¹¹⁾。前者は、外側膝状体、視放線を経由して視覚中枢へ至る系であり、後者は副視索の関与が推察されている。前者からの出力として中脳上丘から頸髄へ下行する tectotegmentospinal pathway および tectoreticulospinal pathway が考えられている^{12, 13)}。一方、Nashner¹⁴⁾は、支持台を急速に移動させて (0.2m/sec)、姿勢制御に外乱を加えた条件下で視覚の影響をみた結果、100~150msec の間に腓腹筋の筋電図活動が影響を受けたことを報告し、視覚の姿勢制御に対する影響は tectotegmentospinal pathway および tectoreticulospinal pathway よりもっと複雑な経路を推定している。すなわち、視覚を介した姿勢制御は、大脳を介した制御を受けていると考えられる¹⁵⁾。

今回の研究でも青壮年者における開眼および閉眼時の重心動揺図の面積および軌跡長は振動負荷により増大を示した。とくに、前後動揺が大きくなった。このことは、足関節に終止を持つ下腿三頭筋は収縮することによって前方への転倒を防ぐ機能を有していることと深い関係があると考えられる。Eklund¹⁶⁾ および本間¹⁷⁾による筋に振動を負荷する研究によると、アキレス腱に振動を加えると、筋紡錘がその振動を感知し、環らせん終末に変形が起こり受容器電位が発生し、Ia 線維に放電が起こり脊髄レベルで α 運動ニューロンに活動電位が発生して、筋の収縮が生じるとされている。この結果、重心の後方への移動が起こるとされる。このことは Pyykkö¹⁸⁾による、振動開始後一過性に前方の移動が生じ平均 1.3秒後に後方の移動が出現し、2.5秒後に新たな定常状態が完成するとの報告と呼応する。また、Magnusson ら¹⁹⁾により、ヒラメ筋への20Hzの振動負荷では、身体動揺に影響を及ぼさないが、100Hzまでは直線的に重心動揺性が増加したと報告されている。故に今回使用した 100Hzの振動は、最大の刺激を与えうる

ものであり、筋紡錘および Golgi 腱器官を介した外乱を与えるに十分な振動刺激と考えられた。この振動による重心動揺性の増大は開眼時よりも閉眼時により著明であり、視覚を介した制御が外乱による誤った情報の入力を打ち消して直立姿勢維持を補っていることが示唆された。

しかるに、高齢者ではこの視覚による打ち消し現象は青壮年者と比べ軽微であったことは、固有受容体の機能がすでに低下して視覚に依存しているとみられよう。一方、重心動揺を構成する波形を明らかにする周波数分析の結果からは、青壮年者では、前後、左右方向別には 2 Hz以上の周波数帯域からなる重心動揺の抑制に固有受容体が寄与しているといえる。このことは視覚入力と異なり、固有受容体入力では重心動揺において周波数特異性を持っていることを示している。下肢の固有受容体への外乱を起こす方法には次の6つの方法がある。① 下腿三頭筋への振動負荷、② 足関節の mechanoreceptor を刺激するために支持台傾斜法(Nashner ら²⁰⁾)、③ 阻血により足底知覚、足関節の mechanoreceptor をブロックする方法(Mauritz ら²¹⁾)、④ ラバーフォーム上に起立させる方法⁴⁾、⑤ 足関節以下を冷却させる方法¹⁹⁾、⑥ 下肢を水浸させる方法²²⁾である。これらは、外乱ではそれぞれ影響をうける固有受容体の部位に差がみられるが、今回のアキレス腱への振動は重心動揺計を使用でき、定量的に負荷できるという利点を有する。

正常に静止姿勢を維持するためには抗重力筋の持続的収縮が必要である。この収縮は $\alpha-\gamma$ linkage によって持続的に維持されている。筋紡錘および腱器官からの知覚情報は前述の脊髄レベルでの反射のほか、クラーク柱でニューロンを変えて上行する背側脊髄小脳路、あるいは、腹側脊髄小脳路として苔状線維により小脳虫部に伝達される。小脳虫部は筋トーンス、姿勢の調節に関与する出力を放出する。出力系としては錐体外路系として皮質、室頂核から下肢へ外側前庭脊髄路、赤核脊髄路、毛様体脊髄路として下行する系がある^{23, 24)}。このように振動負荷は、脊髄レベルでの反射および錐体外路系を介した姿勢反射にも影響を与えているものと考えられる。

前庭性入力の重心動揺に関与している周波数帯域については、分析方法の違いなどから見解は一致し

ていない。徳増ら²⁵⁾による正常例と前庭障害例における検討では、前庭性入力は、3 Hzまでの比較的低い周波数の重心動揺に影響をあたえたとされている。今回用いた 100 Hzの固有受容体への外乱は、これとは対照的におよそ 2 Hz以上の周波数帯域の動揺性に影響を与えており、前庭系と固有受容体では重心動揺の異なった成分を互いに分担し、補完していると推測できるかもしれない。

一方、高齢者では閉眼時で振動を負荷しても重心動揺図の面積、軌跡長の増大はみられないことは一つの特徴ともいえる。また、開眼時には 1 Hz以上の動揺周波数で影響を受ける傾向、とくに 3 Hz以上では有意に影響を受ける事実は、青壮年者における振動負荷の結果と考え合わせると、高齢者では固有受容体入力の重心動揺における機能が低下していると推定される。現在までに、tonic vibration reflexの閾値の変化をパラメーターとした筋紡錘およびゴルジ腱器官の加齢による機能低下の報告はない。しかし、高齢者における固有受容体入力の低下に関して次のようなことが明らかにされている。Potvin ら²⁶⁾は、高齢者の認知機能、視覚、筋力、運動協調能および知覚について検討し、振動覚と閉眼片足立ちが最も加齢の影響をうけるとしている。Wolfson ら²⁷⁾も高齢者では振動覚の低下があることを示した。Skinner ら²⁸⁾も高齢者では関節の位置覚も減弱することを示した。また、固有受容体系と体平衡に関しては、Pyykkö ら^{3, 4)}は、下腿筋に 80 Hzの振動刺激を加えて、閉眼時の振動負荷時と natural stanceでの動揺速度の比 (proprioceptive quotient) を算出した。この比が低いほど、固有受容体からの寄与が大きいことを意味するが、20~60才までの群では 0.7であったのに対して高齢者の群では 0.8であり、固有受容体入力の寄与の低下を示唆している。かくして、高齢者の重心動揺の不安定さには、固有受容体系の入力低下が一つの大きな因子となっていることが示唆される。

一方、高齢者では出力として下肢筋力低下がみられ、組織学的にも、筋線維の萎縮がみられることから^{26, 27)}、高齢者では入・出力系の双方の障害は当然考えなければならない。Manchester ら²⁹⁾は、platform を水平移動および回転させた条件での前脛骨筋の潜時には加齢の影響はないが、高齢者では外乱

により対立筋を活性化しやすい傾向があり、また、筋の潜時から、ankle strategy より hip strategy であり、すなわち、近位筋有意で姿勢を維持することが青壮年者と異なるとしている。また、Woollacott ら⁹⁾は、一側の支持台を上昇、他方を下降させることによって long loop reflex を活性化させたところ、高齢者では前脛骨筋と腓腹筋の潜時の差が若年者に比べて大きく、協調運動能が障害されていることを示した。かくして、高齢者での固有受容体入力の低下と、出力系である筋線維萎縮や協調能低下が加味されて姿勢維持機能が低下しているものと推察した。したがって、高齢者の姿勢維持には相対的に視覚情報や前庭入力に頼らざるをえないといえる。

結 語

高齢者の姿勢制御機能を重心動揺として検討し、次のような知見が得られた。

1. 重心動揺の面積および、軌跡長において、高齢者は青壮年者に比して個体差が大きい、前後動揺が左右動揺に比べより強く加齢の影響を受けると判断された。
2. ロンベルグ比は青壮年者と高齢者の間には差異はなかった。周波数分析の結果から視覚は青壮年者および高齢者ともに、0.1 Hzから 3.96 Hz⁴⁾までの広い周波数帯域の動揺に関与しており、直立姿勢維持機能に重要な役割を果たしていると推察された。
3. 振動負荷による外乱は青壮年者では重心動揺の増加を招来し、これは、2 Hz以上の周波数成分を持つ動揺に影響があると考えられた。しかるに高齢者では振動負荷による動揺の増加はみられなかった。この結果から高齢者では固有受容体からの重心動揺に寄与する入力の低下があり、これが高齢者の平衡障害の一つの特徴と推察された。

御指導いただいた水越鉄理教授に深く感謝します。

本論文の一部は、第 2 回耳鼻咽喉科老化研究会 (東京)、第 50 回日本平衡神経科学会 (横浜) および第 1 回平衡機能の発達と加齢の研究会 (大阪)、第 9 回国際姿勢学会 (ポートランド) で発表した。

文 献

- 1) 中川 肇, 水越鉄理, 渡辺行雄ほか: 高齢者のめまい, 平衡障害の実態について. 耳鼻臨床 **77**: 1323—1329, 1984.
- 2) Rubinstein L. Z., Robbins A. S., Schulman B. L. et al. : Falls and instability in the elderly. JAGS **36** : 266—278, 1988.
- 3) Pyykkö I., Aalto H., Hytonen M. et al. : Effect of age on postural control. In : Posture and Gait : Development, Adaptation and Modulation. (Amblard B., Berthoz A., Clarac F. eds) : 95—104, Excerpta Medica, Amsterdam, 1988.
- 4) Pyykkö I., Jantti P., and Aalto H. : Postural control in the oldest old. Adv. Oto-laryng. **41** : 146—151, Karger, Basel, 1988.
- 5) 中川 肇, 水越鉄理, 渡辺行雄ほか: 高齢者のめまい, 平衡障害(第3報)—温度眼振検査と重心動揺検査における加齢の影響および各検査間の相関関係に関する検討—. Equilibrium Res. **47** : 319—322, 1988.
- 6) Brocklehurst J. C., Robertson D. and James-Groom P. : Clinical correlates of sway in the old age. Age and Aging **11** : 1—10, 1982.
- 7) 河野 薫, 伊保清子, 浅野和江ほか: ドック受診者における重心動揺成績(1) 第1回小児と高齢者の平衡機能研究会抄録. 1991, 印刷中.
- 8) Straube A., Botzel K., Paulus W. et al. : Postural control in the elderly. Differential effect of visual, vestibular and somatosensory input. In : Posture and Gait. Development, Adaptation and Modulation. (Amblard B., Berthoz A. and Clarac F. eds) : 105—114, Excerpta Medica, Amsterdam, 1988.
- 9) Woollacott M. H., Shumway-Cook A. and Nashner L. : Postural reflex and aging. In : Advances in neurogerontology, Vol. 3, The aging motor system. (Mortimer J. A., Pirozzolo F. J., Maletta G. J. eds) : 98—119, Praeger, New York, 1982.
- 10) 徳増厚二, 米田 敏, 池上彰博ほか: 直立時重心動揺の再現性について —正常者の周波数分析—. Equilibrium Res. **44** : 24—31, 1984.
- 11) 福田 淳: 視覚伝導路 田崎京二, 小川哲朗編 新生理科学体系(9). 112—29, 医学書院, 東京, 1989.
- 12) Anderson M. E., Yoshida M. and Wilson V. J. : Influence of superior colliculus on cat neck motoneurons. J. Neurophysiol. **34** : 898—900, 1971.
- 13) Maeda M., Magherini P. C. and Precht W. : Functional organization of forelimb motoneurons in the frog. J. Neurophysiol. **40** : 225—243, 1977.
- 14) Nashner L. M. : Visual contribution to rapid motor responses during floor oscillation. Brain Res. **105** : 403—407, 1978.
- 15) 山中泰輝: 中枢神経系, 日本平衡神経科学会編: 平衡機能検査の手引き. 23—30, 南山堂, 東京, 1983.
- 16) Eklund G. : General features of vibration-induced effects on balance. Uppsala J. Med. Sci. **77** : 112—124, 1972.
- 17) 本間三郎: TVRの神経生理学的基礎—伸張反射, 腱反射, γ 系などの関連—. 臨床生理 **2** : 319—323, 1972.
- 18) Pyykkö I., Aalto H., Seidel H. et al. : Hierarchy of different muscles in postural control. Acta Otolaryngol. (Stockh.) Suppl. **468** : 175—180, 1989.
- 19) Magnusson M., Enbom H., Johansson R. et al. : Significance of pressor input from the human feet in anterior-posterior postural control. The effect of hypothermia on vibration-induced body sway. Acta Otolaryngol. (Stockh.) **110** : 182—188, 1990.
- 20) Nashner L. M. : Adapting reflexes controlling the human posture. Exp. Brain Res. **26** : 59—72, 1976.
- 21) Mauritz K.-H. and Dietz V. : Characteristics of postural instability induced by ischemic blocking leg afferents. Exp. Brain Res. **38** :

- 117—119, 1980.
- 22) Mano M., Hibino R., Takagi S. et al. : Effects of weightlessness on posture controlling system in human subjects. Proceedings of the Bárány Society, selected papers from the fifth extraordinary meeting of the Bárány Society, Kyoto, 1975.
- 23) 小野武年, 大村 裕: 脳幹 (中脳・橋・延髄) 大村 裕編 概説生理学: 187—202, 南江堂, 東京, 1988.
- 24) 中村嘉男: 脳幹 問田直幹, 内蘭耕二, 伊藤正男 他編, 新生理学: 298—321, 医学書院, 東京, 1982.
- 25) 徳増厚二, 田代直樹, 池上彰博ほか: ヒト直立姿勢の重心動揺記録による検討 日耳鼻 85: 1181—1182, 1987.
- 26) Potvin A. R. and Syndulko K., Tourtelette W.W. et al. : Human neurologic function and the aging process. J. Am. Geriatr. Soc. 28: 1—9, 1980.
- 27) Wolfson L. I., Whipple R., Amerman P. et al. : Gait and balance in the elderly. Two functional capacities that link sensory and motor ability to falls. Clin. Geriatr. Med. 1: 649—659, 1985.
- 28) Skinner H. B., Barrack R. L. and Cook S. D. : Age-related decline in proprioception. Clin. Orthop. 184: 208—211, 1984.
- 29) Manchester D., Woollacott M., Zederbauer-Hyton N. et al. : Visual, vestibular and somatosensory contributions to balance control in the older adult. J. Gerontol. 44: M118—127, 1989.